

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



EVALUACIÓN DE EXTRACTOS VEGETALES CON NANOPARTÍCULAS DE
DIÓXIDO DE SILICIO PARA EL CONTROL DE INSECTOS PLAGA DE GRANOS
ALMACENADOS

TESIS

Que presenta SAÚL ENRIQUE URIBE RIVERA

Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN PARASITOLOGÍA AGRÍCOLA


Saltillo, Coahuila

Julio 2022

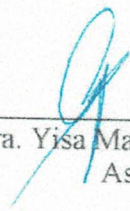
EVALUACIÓN DE EXTRACTOS VEGETALES CON NANOPARTÍCULAS DE
DIÓXIDO DE SILICIO PARA EL CONTROL DE INSECTOS PLAGA DE GRANOS
ALMACENADOS

Tesis

Elaborada por SAÚL ENRIQUE URIBE RIVERA como requisito parcial para obtener
el grado de Maestro en Ciencias en Parasitología Agrícola con la supervisión y
aprobación del Comité de Asesoría




Dr. Ernesto Cerna Chávez
Asesor principal



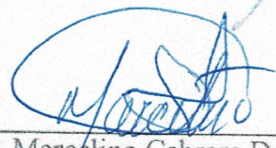
Dra. Yisa María Ochoa Fuentes
Asesor



Dr. Luis Alberto Aguirre Uribe
Asesor



Dr. Edgar Omar Rueda Puente
Asesor



Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente
Subdirector de Postgrado
UAAAN

Saltillo, Coahuila.

Julio 2022

Agradecimientos.

A Dios y a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por brindarme la oportunidad de cursar y concluir un postgrado con el excelente nivel académico que maneja. A los Doctores del programa de la Maestría en Ciencias en Parasitología Agrícola por todas las enseñanzas académicas y personales, en especial al Dr. Ernesto Cerna Chávez por los conocimientos transmitidos, su paciencia y cada uno de sus consejos, así como a la Dra. Yisa María Ochoa Fuentes por su gran apoyo desde la coordinación académica del postgrado.

A las personas que de alguna manera hicieron posible que cursara mi programa de postgrado, en especial al Dr. Edgar Omar Rueda Puente por su apoyo y asesoramiento, a la Dra. Nina Gisela Heredia Sandoval por extenderme su más sincera recomendación al momento de buscar un programa académico. A mi familia, ya que gracias a ellos y su apoyo pude viajar y concluir el programa.

A mis amigos que de alguna manera estuvieron presentes a la distancia, y en especial a Lisett Romero Pavón, por su sincera amistad y acompañamiento en este periodo y en cada una de las clases y experiencias que compartimos en el postgrado; así como a la M.C. Dulce Rocío Murrieta Ruiz por su amistad y consejos desde 2017.

Agradezco de manera muy especial a los Doctores Angélica Nohemí Díaz Castaño y Diego Ramírez Rodríguez, a quienes tuve la fortuna de conocer y por su invaluable apoyo a mi salud.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo de beca otorgado para lograr la conclusión de mis estudios en tiempo y forma del programa Maestría en Ciencias en Parasitología Agrícola.

Índice general

Agradecimientos.....	iii
Índice general.....	iv
Lista de cuadros.....	vi
Resumen.....	vii
Abstract.....	viii
Introducción.....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.1.1 Objetivo específico.....	2
1.2 Hipótesis.....	2
Revisión de literatura.....	3
2.1 Importancia de los granos almacenados.....	3
2.1.1 Los granos en México.....	3
2.1.2 Importancia de los insectos plaga de granos almacenados.....	4
2.2. Gorgojo del maíz (<i>Sitophilus zeamais</i> M.).....	5
2.2.1. Clasificación taxonómica.....	5
2.2.2 Ciclo de vida de <i>Sitophilus zeamais</i> M.....	5
2.2.3 Daños.....	6
2.3 Barrenador menor de los granos (<i>Rhizopertha dominica</i> F.).....	7
2.3.1 Clasificación taxonómica.....	7
2.3.2 Ciclo de vida de <i>R. dominica</i> F.....	8
2.3.3 Daños.....	9
2.4 Gorgojo castaño de la harina (<i>Tribolium castaneum</i> Herbst).....	9
2.4.1 Clasificación taxonómica.....	9
2.4.2 Ciclo de vida de <i>T. castaneum</i> H.....	10
2.4.3 Daños.....	10
2.5 El control de los insectos plaga de granos almacenados.....	11
2.6 Nanotecnología y extractos.....	11
2.6.1 Nanoformulaciones.....	12
2.7 Nanopartículas y dióxido de silicio.....	12
2.7.1 Antecedentes de nanopartículas de dióxido de silicio en granos almacenados.....	13

2.7.2 Modo de acción de las nanopartículas de dióxido de silicio.....	14
Materiales y métodos.....	15
3.1 Ubicación del experimento.....	15
3.2 Obtención y mantenimiento de colonias de insectos.....	15
3.2.1 <i>T. castaneum</i> H.....	15
3.2.2 <i>R. dominica</i> F.....	15
3.2.3 <i>S. zeamais</i> M.....	15
3.3 Extractos y concentraciones evaluadas.....	15
3.4 Bioensayo.....	17
3.5 Análisis estadístico.....	18
Resultados y discusión.....	19
Conclusiones.....	25
Referencias.....	26

Lista de Cuadros.

Cuadro 1. Función de cada uno de los extractos evaluados.....	16
Cuadro 2. Rango de concentraciones evaluadas para cada extracto sobre <i>T. castaneum</i>	16
Cuadro 3. Rango de concentraciones evaluadas para cada extracto sobre <i>R. dominica</i> .	17
Cuadro 4. Rango de concentraciones evaluadas para cada extracto sobre <i>S. zeamais</i> . ..	17
Cuadro 5. Determinación de la concentración letal media, límites fiduciales al 95 % de confianza y ecuación de predicción para <i>T. castaneum</i>	19
Cuadro 6. Determinación de la concentración letal media, límites fiduciales al 95 % de confianza y ecuación de predicción para <i>R. dominica</i>	20
Cuadro 7. Determinación de la concentración letal media, límites fiduciales al 95 % de confianza y ecuación de predicción para <i>S. zeamais</i>	20

Resumen

Los insectos plaga de granos almacenados constituyen uno de los principales factores que contribuyen a la pérdida de granos a nivel mundial, tanto en el valor económico como en el nutrimental: de estos insectos, destacan *R. dominica*, *S. zeamais* y *T. castaneum*. Si bien, tradicionalmente, su control se ha llevado a cabo por el método químico, esto ha contribuido a problemas de resistencia a nivel mundial. Considerando las novedosas aplicaciones de la nanotecnología en la agricultura el objetivo de ésta investigación fué evaluar ocho extractos: Azeem®, Azeem Nano®, Higuer®, Higuer Nano®, Haarp®, Haarp Nano®, Etos® y Etos Nano® con y sin nanopartículas de dióxido de silicio, sobre cada uno de los insectos plaga seleccionados. Los resultados muestran que para *S. zeamais*, todos los extractos evaluados tuvieron un buen control, donde Etos Nano® obtuvo el valor de CL₅₀ más bajo. Para *T. castaneum*, las mejores opciones para su manejo fueron Higuer Nano® y Etos Nano®. En el resto de los extractos, los valores de CL₅₀ fueron menores para los productos solos. En el caso de *R. dominica*, todos los extractos solos mostraron valores de CL₅₀ menores que sus respectivos productos con nanopartículas, donde las mejores opciones para su manejo serían Azeem® y Etos®. En relación a la respuesta de los insectos a los distintos extractos se considera que podría estar influenciada por la morfología, etología, las características cuticulares y su interacción con las nanopartículas de dióxido de silicio dado su mecanismo de acción.

Palabras clave: Extractos, plagas de granos almacenados, nanopartículas de silicio.

Abstract

Insect pests of stored grains are one of the main factors contributing to grain loss worldwide, causing losses of economic and nutritional value; these insects include *R. dominica*, *S. zeamais* and *T. castaneum*. Although their control has traditionally been carried out by chemical methods, this has contributed to resistance problems worldwide; therefore, considering the novel applications of nanotechnology in agriculture, the objective of this research was to evaluate eight extracts: Azeem®, Azeem Nano®, Higuer®, Higuer Nano®, Haarp®, Haarp Nano®, Etos® and Etos Nano®, with and without silicon dioxide nanoparticles, on each of the selected pest insects. Results show that on *S. zeamais*, all evaluated extracts had good control; Etos Nano®, had the lowest LC₅₀ value. For *T. castaneum* the best options for its management were Higuer Nano® and Etos Nano®. In the rest of the extracts, the LC₅₀ values were lower for the single versions. While in the case of *R. dominica* all the extracts alone showed lower LC₅₀ values than their respective products with nanoparticles, in which the best options for its management are Azeem® and Etos®. Regarding the response of the insects to the different extracts, it is considered that it could be influenced by morphology, ethology, cuticular characteristics and their interaction with the silicon dioxide nanoparticles.

Key words: Extracts, stored grain pests, silicon dioxide nanopartículas .

Introducción

Los cultivos de maíz, frijol, trigo y arroz están considerados como granos de gran relevancia en México, pues garantizan la seguridad alimentaria de la población nacional dado su contenido y aporte de diversos nutrientes (SADER, 2019).

Dentro de los factores que causan daño en granos almacenados los insectos plaga son considerados un problema serio dado que causan pérdidas económicas y deterioran la calidad nutricional de granos (Trivedi, *et al.*, 2018). Si bien cerca de mil especies de insectos son considerados plagas de granos alrededor del mundo, solo unas pocas son consideradas como plagas de importancia mayor, debido al daño severo que pueden causar a los granos almacenados (Srivastava & Subramanian, 2016). Bajo este contexto, las plagas primarias son aquellas capaces de atacar el grano intacto mientras que las secundarias son aquellas que atacan el grano previamente dañado (FAO, 2000). En la clasificación de plagas primarias, encontramos a *Sitophilus zeamais* y *Rhyzopertha dominica* y en la de plagas secundarias a *Tribolium castaneum* (Rajashekar *et al.*, 2012) Dado que su control se basa principalmente en insecticidas químicos sintéticos, los problemas de resistencia se han incrementado a nivel mundial, convirtiéndola en una situación de importancia global (Attia, *et al.*, 2020; Sparks *et al.*, 2021) junto con los efectos negativos que pueden surgir como afectaciones a la salud humana, toxicidad en organismos no objetivo e implicaciones ecológicas (Hayat *et al.*, 2018) obligan a buscar nuevas soluciones para éste y otros retos que afronta la agricultura, la nanotecnología surge como una herramienta novedosa y atractiva para disminuir la cantidad y manera en cómo se administran los pesticidas así como el desarrollo de novedosos ingredientes activos, que en su conjunto son llamados nano pesticidas (Shukla *et al.*, 2019). Es por ello que, en la búsqueda de alternativas, particularmente, las nanopartículas de dióxido de silicio presentan excelente compatibilidad con un rango amplio de moléculas y pueden actuar como excelentes nano acarreadores (Rastogi *et al.*, 2019). Objetivo??

1.1 Objetivo general.

Evaluar el control de insectos plaga de almacén utilizando extractos con nanopartículas de dióxido de silicio.

1.1.1 Objetivo específico.

Evaluar el efecto de extractos vegetales con nanopartículas de dióxido de silicio para el control de insectos plaga de almacén.

1.2 Hipótesis.

Los extractos con nanopartículas tendrán mayor significancia insecticida sobre los insectos plaga de almacén.

Revisión de literatura

2.1 Importancia de los granos almacenados.

Los granos son de vital importancia para la seguridad alimentaria a nivel mundial, ya que constituyen materia prima a partir de la cual se elaboran productos derivados y son una fuente esencial de calorías, y por ende vital para la alimentación de grandes sectores de la población, especialmente aquella de escasos recursos, por lo que su almacenaje constituye una parte fundamental (AMIS, 2021). Se trata de uno de los alimentos básicos más relevantes para la humanidad, y con la finalidad de satisfacer los requerimientos de una población en constante aumento, la producción de granos se ha incrementado de manera continua en los últimos 50 años (FAO, 2017), de tal manera que la producción actual, a nivel mundial, de granos está estimada en 2,281,000,000 Ton (IGC, 2022).

2.1.1 Los granos en México.

En México los granos demandan cuidados especiales por su valor económico, alimenticio, agrícola e industrial por lo que es necesario recurrir a su almacenamiento y conservación (ASERCA, 2018), existen cuatro granos considerados básicos por su importancia en la alimentación de la población a nivel nacional, estos son: maíz, frijol, arroz y trigo (SIAP, 2022), cuya producción en México es relevante puesto que se destaca como uno de los principales productores de maíz grano, ocupando el octavo lugar a nivel mundial, con una producción de 27,424,528 Ton, encabezada por los estados de Sinaloa, Jalisco y Michoacán. Para el caso de trigo grano se contó con una producción de 2,986, 689 Ton donde los principales estados productores son Sonora, Guanajuato y Sinaloa. El cultivo de arroz cuenta con 295,338 Ton, encabezando la lista de estados productores Nayarit, Campeche y Veracruz. El frijol contó con una producción de 1,056,071 Ton, con los estados de Zacatecas, Sinaloa y Nayarit como los principales productores (SIAP, 2021). De la producción total de granos en México la pérdida estimada por insectos plaga de granos almacenados asciende, dependiendo de las condiciones, a un rango del 5 al 25 % de la producción (Hernández y Carballo, 2014).

2.1.2 Importancia de los insectos plaga de granos almacenados.

Uno de los factores que contribuye de manera significativa a la crisis alimentaria a nivel mundial es la pérdida de granos, principalmente causada por los insectos plaga de almacén (Golden *et al.*, 2017), afectando el proceso desde la cosecha hasta el almacenamiento (Kumar y Kalita, 2017). A nivel mundial la pérdida de granos destinados a la alimentación por infestaciones de insectos plaga, está estimado entre un 10 % a un 40 % de la producción (Asrar *et al.*, 2016). Las pérdidas, de la producción total, por insectos en granos almacenados se estiman en 1 a 2 % en países desarrollados mientras que para aquellos en vías de desarrollo oscilan entre 20 a 50% (Jayas, 2012; FAO, 2017)

Un gran número de insectos plaga de granos almacenados han sido reportados y casi todas las especies tienen una alta capacidad de reproducción y multiplicación y pueden llegar a destruir del 10 al 15 % del grano y contaminar el resto con olores y sabores poco agradables, así como exuvias y heces (Said & Pashte, 2015). Entre estos el gorgojo castaño de la harina *Tribolium castaneum* (Herbst, 1797) (Coleoptera: Tenebrionidae), el barrenador menor de los granos *Rhyzopertha dominica* (Fabricius, 1792) (Coleoptera: Bostrichidae) y el gorgojo del maíz *Sitophilus zeamais* (Motschulsky, 1855) (Coleoptera: Curculionidae), constituyen tres de los insectos plaga de granos almacenados más destructivos a nivel mundial (Edde, 2012; Chen *et al.*, 2015; Patiño-Bayona *et al.*, 2021), afectando el valor nutricional, la viabilidad de semilla, el valor de mercado y la reducción del peso seco de los granos, (Goñi *et al.*, 2017; Sleem, 2021). Las tres especies comparten algunas características como distribución cosmopolita (Upadhyay *et al.*, 2018; Quellhorst *et al.*, 2020; Sleem, 2021), la capacidad de infestar diversos productos como arroz, trigo, cebada, sorgo, frutos secos además algunos procesados como pasta y chocolate en el caso de *S. zeamais*, así como *T. castaneum* puede afectar legumbres y especias (Abou-Taleb *et al.*, 2016; Maggioni *et al.*, 2016), alto potencial reproductivo y adaptabilidad en ambientes diversos como molinos de harina, graneros y plantas procesadoras (Mahroof y Hagstrum, 2012; Lorini *et al.*, 2015; Pires y Nogueira, 2018). Los hábitos alimenticios de estas tres especies difieren, pues *S. zeamais* y *R. dominica* son perforadores (Nwosu, 2018; Scheff *et al.*, 2022) mientras *T. castaneum* usualmente se alimenta de granos dañados (Deshwal *et al.*, 2020).

2.2. Gorgojo del maíz (*Sitophilus zeamais* M.)

El gorgojo del maíz, *Sitophilus zeamais* M., es una plaga cosmopolita que causa daño extensivo e irreparable a los granos almacenados (de Lira *et al.*, 2015) y cuenta con la capacidad de realizar una infestación cruzada a varios productos (Lunardi & Lorini, 2008). Este insecto podría tener su origen en las regiones del sureste de Asia e India (Corrêa *et al.*, 2016). Es considerado una plaga muy importante en granos almacenados, la infestación casi siempre comienza en campo, pero el daño durante el almacenaje llega a ser de gran consideración (Suleiman *et al.*, 2015), estimándose desde un 20 % hasta un 90 % de la producción en granos sin tratar (Giga *et al.*, 1991). Los daños al grano lo ocasionan las larvas y los adultos. Éstos últimos perforan el grano para ovipositar, mientras que las larvas forman surcos en el endospermo para alimentarse (García-Lara *et al.*, 2007).

2.2.1. Clasificación taxonómica.

Sitophilus zeamais (Motschulsky, 1855) (Coleoptera: Curculionidae)

Reino: Animalia

Phylum: Arthropoda

Clase: Insecta

Orden: Coleoptera

Suborden: Polyphaga

Familia: Curculionidae

Género: *Sitophilus*

Especie: *zeamais*

2.2.2 Ciclo de vida de *Sitophilus zeamais* M.

El ciclo biológico demora de cuatro a seis semanas, y puede variar entre 30 y 113 días dependiendo de la temperatura, con un rango de entre 26 a 30 grados centígrados y 70 % de humedad relativa (Sedlacek *et al.*, 1991). Los adultos pueden vivir de cuatro a cinco meses (García-Lara *et al.*, 2007; Ruiz *et al.*, 2013) y la infestación del grano por *S. zeamais* puede favorecer el establecimiento de colonizadores secundarios y patógenos (Trematerra *et al.*, 2007).

Huevo: Son transparentes o blanco opaco, en forma de pera u ovoide, mide 0.7 mm de largo y 0.3 mm de ancho aproximadamente y son depositados en orificios en el grano hechos por la hembra. Cada huevo es cubierto por una sustancia gelatinosa (mucílago transparente) producida por la hembra (García-Lara *et al.*, 2007; Ruiz *et al.*, 2013).

Larva: Es de color blanco, blanco grisáceo y ápoda. Pasa por cuatro estadios larvales y durante estos periodos se alimenta dentro del grano. Posee una cápsula cefálica de color café claro, cabeza color oscuro y cuerpo recurvado (Gutiérrez, 1990; Ruiz *et al.*, 2013).

Pupa: Es del tipo exareta, y de color blanco aperlado. Mide aproximadamente cinco mm de longitud y se encuentra en el interior de los granos (Gutiérrez, 1990; Ruiz *et al.*, 2013).

Adulto: Miden de 2.5 a 4 mm de longitud y el color puede variar de café a negro. Son buenos voladores. El aparato bucal del macho es más corto y rugoso que el de la hembra, el cual es ligeramente más alargado, delgado y con menos rugosidades. Poseen antenas acodadas de 8 segmentos (Ruiz *et al.*, 2013).

2.2.3 Daños.

La hembra adulta es la encargada de perforar el grano con su aparato bucal y posteriormente ovipositar dentro del mismo para posteriormente cubrirlos con una sustancia de consistencia gelatinosa. Una hembra puede ovipositar en su vida entre 300 a 400 huevos. Los huevos eclosionan (en función de la temperatura) de entre tres a cinco días después de haber sido ovipositados y la larva se alimenta del interior del grano, destruyendo el embrión. Cuando el adulto emerge corta agujeros circulares en la testa y se alimenta del grano, llegando a reducirlo a polvo casi en su totalidad (Velasquez *et al.*, 1985; Pérez, 1998; Ruiz *et al.*, 2013).

2.3 Barrenador menor de los granos (*Rhyzopertha dominica* F.)

R. dominica F., es un insecto que se alimenta de una gran variedad de cereales y granos almacenados, causando grandes pérdidas económicas (Levy-de la Torre *et al.*, 2018), tiene gran capacidad de volar de un lugar previo a otro y viceversa, pudiendo intercalar entre zonas agrícolas y no agrícolas (Mahroof *et al.*, 2010). Infesta diversos granos almacenados, pero principalmente trigo y maíz (García-Lara *et al.*, 2007), pudiendo moverse hasta una profundidad de 12 m en la masa de granos infestados, que es mayor a las reportadas para otros insectos plaga de granos almacenados (Flinn *et al.*, 2010). El insecto posee un sistema enzimático muy eficiente, varias isoamilasas, que le permite hidrolizar el almidón del grano (Cinco-Moroyoqui *et al.*, 2008). *R. dominica* es capaz de localizar nuevas fuentes de alimento en pleno vuelo gracias a la detección de químicos volátiles emitidos por la interacción anfitrión-producto alimenticio (Ahmad *et al.*, 2013). La etapa adulta del insecto es considerada la más destructiva gracias a que son muy voraces y su esperanza de vida puede variar entre 25 a 65 días dependiendo de las condiciones ambientales (Edde, 2012).

2.3.1 Clasificación taxonómica.

Rhyzopertha dominica (Fabricius, 1792) (Coleoptera: Bostrichidae)

Reino: Animalia

Phylum: Arthropoda

Clase: Insecta

Orden: Coleoptera

Suborden: Polyphaga

Familia: Bostrichidae

Género: *Rhyzopertha*

Especie: *dominica*

2.3.2 Ciclo de vida de *R. dominica* F.

R. dominica es un insecto holometábolo, lo que significa que posee una metamorfosis completa. Su ciclo tiene 4 estadios: huevo, larva, pupa y adulto; su desarrollo completo, desde huevo a adulto, puede variar dependiendo de las condiciones ambientales desde 25 a 65 días pudiendo ser en promedio 58 días, con humedades relativas del 30 % (Edde, 2012).

Huevo: Posee una forma oval, con un aproximado de 0.5-0.6 mm de largo y 0.2-0.25 mm de diámetro. Son opacos de color blanquecino, con una consistencia cerosa cuando son recién ovipositados adquiriendo poco después una coloración rosada (Kučerová, & Stejskal, 2008).

Larva: Posee cuatro instares, la forma del primero es campodeiforme con partes bucales mandibuladas, midiendo aproximadamente 0.78 mm de largo y 0.13 mm de ancho en la cápsula cefálica. El segundo instar es similar en forma al primero, pero más grande con medidas aproximadas de 1.1 mm de largo y 0.17 mm de ancho en la cápsula cefálica. El tercer y cuarto instar son de aspecto curvo y de forma escarabeiforme, siendo en gran medida inmóviles. En el cuarto instar es posible observar que la región ventral tiene una coloración blanca, la cabeza es café claro y la coloración de las mandíbulas se torna café oscuro, casi negro (Potter, 1935; Edde, 2012).

Pupa: Se trata de una pupa exarreta, son inactivas y los movimientos del cuerpo están limitados a los segmentos abdominales. Las Pupas jóvenes son blanquecinas en color, pero conforme se desarrollan es posible notar pigmentación café en ojos y partes bucales. Las longitudes promedio del cuerpo y de la cápsula cefálica son 3.9 y 0.6 mm, respectivamente. La duración promedio de esta fase es de 6 a 9 días (Winterbottom, 1922; Edde, 2012).

Adulto: Posee una longitud de entre 2 a 3 mm, de color café castaño o negruzco, de cuerpo cilíndrico y alargado. Los élitros poseen una apariencia estriada (García-Lara *et al.*, 2007).

2.3.3 Daños.

Los daños comunes constituyen las perforaciones del grano y la formación de polvo. Las hembras depositan los huevos en la superficie de los granos y cuando eclosionan, las larvas se abren camino hacia el interior, donde permanecen hasta alcanzar la madurez. La larva en desarrollo se alimenta en el interior del grano causando pérdida de peso y daños al germen y endospermo (Neethirajan *et al.*, 2007; Özkaya *et al.*, 2009). El adulto emerge del grano perforando un agujero de salida, ocasionando daño físico y pérdida de peso en grano, dado los hábitos de alimenticios tanto internos como externos de larvas y adultos, respectivamente (Campbell & Sinha, 1976; Evans, 1981; García-Lara *et al.*, 2007).

2.4 Gorgojo castaño de la harina (*Tribolium castaneum* Herbst).

T. castaneum es considerado como un insecto plaga importante de granos almacenados alrededor del mundo (Sami *et al.*, 2018). Este insecto tiene un origen Indo-australiano y es responsable por grandes pérdidas económicas alrededor del mundo (Mahroof & Hagstrum, 2012). Está catalogado como una plaga secundaria, no es capaz de dañar granos, sino que requiere un sustrato (alimento) que haya sido dañado previamente por una plaga primaria (Jayas *et al.*, 1995). Algunas características biológicas de *T. castaneum* como su corto ciclo de vida, su naturaleza polífaga y su alta capacidad para competir y sobrevivir en condiciones desfavorables lo convierten en una plaga clave de los productos almacenados (Duehl *et al.*, 2011).

2.4.1 Clasificación taxonómica.

Tribolium castaneum (Herbst, 1797) (Coleoptera: Tenebrionidae)

Reino: Animalia

Phylum: Arthropoda

Clase: Insecta

Orden: Coleóptera

Suborden: Polyphaga

Familia: Tenebrionidae

Género: *Tribolium*

Especie: *castaneum*

2.4.2 Ciclo de vida de *T. castaneum* H.

El ciclo biológico de *T. castaneum* dura aproximadamente 25 días. a 32,5° C y 70% de humedad relativa. La temperatura para su desarrollo varía de 20 a 37,5° C y la humedad relativa de 10 a 90% (González *et al.*, 1983).

Huevo: Son de forma arrañonada, ovalada, y de color crema con una longitud promedio de 0.55 mm y un ancho de 0.35 mm. Son ovipositados en la harina o en los granos que servirán de alimento (López Ávila, 1985).

Larva: Cuando está completamente desarrollada mide aproximadamente 7 mm de largo. Es de forma cilíndrica, tiene una coloración blanca-cremosa y con algunas áreas de color ámbar o café debido a esclerotización (López Ávila, 1985; García-Lara *et al.*, 2007)).

Pupa: Es del tipo exareta y cuando está recién formada es de color blanco que se va tornando a tonalidad crema conforme la formación del adulto avanza. Mide de cuatro a cinco mm de longitud (López Ávila, 1985).

Adulto: El adulto es delgado y mide de 3 a 4 mm de largo; es de color que va de rojizo castaño a marrón negruzco. Se le identifica por los últimos tres segmentos antenales, que son proporcionalmente más anchos y mejor definidos que los anteriores (García-Lara *et al.*, 2007).

2.4.3 Daños.

La hembra pone un promedio de 350 a 400 huevos durante más de un año, Es difícil detectar los huevos ya que son depositados de manera aislada en los granos. Los adultos y las larvas se alimentan ya sea de granos o harinas almacenados, o de vegetales secos en molinos y silos de tal manera que los productos infestados por *T. castaneum* despiden un olor fuerte y se tiñen de color marrón, lo cual hace que sean poco aprovechables (García-Lara *et al.*, 2007) añadiendo a esto las heces y restos de insectos muertos y la secreción de quinonas, como compuesto defensivo por parte del insecto, que contribuyen al olor desagradable (Villaverde *et al.*, 2007).

2.5 El control de los insectos plaga de granos almacenados.

Para el combate y prevención de la infestación de los granos almacenados se pueden aplicar diversas estrategias, como el control físico por temperatura, calor y presión, polvos inertes, tierras y aerogeles de silicio, radiación ionizante, control mediante el uso de feromonas y reguladores del crecimiento, control cultural, microbial, biológico y químico (Upadhyay & Ahmad, 2011) de estos métodos, destaca la aplicación de insecticidas químicos sintéticos (Attia *et al.*, 2020), tales como malatión, fluoruro de sulfirilo, bromuro de metilo y fosfina (Athanassiou *et al.*, 2015; Ibrahim, 2015; Opit *et al.*, 2016; Hasan *et al.*, 2020) que por lo general son altamente tóxicos, son usados ampliamente a nivel mundial, lo cual deriva en la aparición de poblaciones resistentes por lo que las medidas de control basadas en esta práctica podrían llegar a fallar (De Andrade *et al.*, 2018) convirtiendo la resistencia a los insecticidas sintéticos en un problema de importancia mundial (Sparks *et al.*, 2021) aunado a los impactos negativos que estos pueden ocasionar al medio ambiente, la salud humana y a los organismos no objetivo (Hayat *et al.*, 2018). En la búsqueda de alternativas a los insecticidas químicos tradicionales la nanotecnología constituye un campo prometedor de investigación interdisciplinaria y ofrece una variedad de aplicaciones en disciplinas como medicina, electrónica y agricultura (Rai & Ingle, 2012).

2.6 Nanotecnología y extractos.

Una de las aplicaciones de la nanotecnología se encuentra en el diseño de insecticidas nano formulados para contrarrestar a los insectos plaga, tanto en campo como en almacén. (Jasrotia *et al.*, 2022). De tal manera que en la búsqueda de soluciones amigables con el ambiente el empleo de los extractos en combinación con las nanopartículas podría aportar grandes bondades al momento de realizar las nanoformulaciones como son: la liberación controlada del compuesto activo, mejora de la estabilidad fisicoquímica, prevención de la degradación del compuesto activo y evitar las pérdidas por volatilización (Jasrotia, 2018; Kashyap *et al.*, 2020; Rikta & Rajiv, 2021).

2.6.1 Nanoformulaciones.

A través de la elaboración de nanoformulaciones se superan limitaciones que manifiestan los bioplaguicidas tradicionales, garantizándose un aumento significativo de la velocidad de disolución, la solubilidad en agua y la uniformidad de dispersión en la aplicación. Si bien no se realiza ninguna alteración química de las moléculas de interés, disminuir el tamaño de partículas a nanoescala permite analizar novedosas propiedades útiles para la producción de nuevos productos (Kumar *et al.*, 2019), en este sentido las nanoformulaciones ofrecen ventajas como menor impacto ambiental y un manejo seguro al realizar las aplicaciones (Venugopal & Sainadh, 2016).

En la clasificación de las nanoformulaciones encontramos tres categorías (Hernández-Tenorio y Orozco-Sánchez, 2019):

- **Nano emulsiones:** Las nanoemulsiones son sistemas cinéticamente estables conformados por la dispersión de dos líquidos inmiscibles, estabilizados mediante un surfactante apropiado, cuyos tamaños de gotas estimados son alrededor de 10 a unos cientos de nanómetros (Wani, *et al.*, 2019).
- **Nanoencapsulación:** se refiere al empaquetamiento de sustancias activas dentro de otro material, donde el tamaño de las nano cápsulas se encuentra comprendido en un intervalo de 1 a 100 nm en al menos una dimensión. Las partículas encapsuladas son denominadas fase interna o núcleo activo y el material de encapsulación es conocido como cubierta o fase externa (Cano-Sarabia & Maspoch, 2016).
- **Nano dispersiones:** La formulación de nanodispersiones sucede por la dispersión de nano cristales en medios líquidos. Los nano cristales suelen ser 100% el compuesto activo en forma de partículas cristalinas o amorfas. Los sistemas cubren un diámetro de partícula de 10-200 nm. El objetivo principal de las nanodispersiones es maximizar el área superficial con el fin de aumentar la saturación de solubilidad del metabolito activo y la velocidad de disolución (Shah *et al.*, 2017).

2.7 Nanopartículas y dióxido de silicio.

El empleo de nanopartículas obtenidas a través de varias rutas de síntesis ha captado la atención de las investigaciones en los años recientes siendo objeto de varios estudios con

la finalidad de probar su potencial tóxico contra amplio número de artrópodos plaga y vectores (Benelli, 2018). Las nanopartículas pueden ser empleadas como insecticidas por sí mismas, pero también pueden actuar como acarreadores para insecticidas químicos (Shahzad & Manzoor, 2019). Existen gran variedad de nanopartículas que pueden ser empleadas como agentes controladores de insectos, por ejemplo, de plata, oro, óxido de aluminio, dióxido de titanio, óxido de zinc, cobre, magnetita y dióxido de silicio (Benelli, 2018; Shahzad & Manzoor, 2019; Jasrotia *et al.*, 2022).

Dentro de la amplia gama de nanopartículas que existen para combatir a los insectos plaga de diversos productos destacan las nanopartículas de dióxido de silicio (SiO₂ NP's) que poseen una serie de características favorables para su empleo, como: elevada estabilidad térmica, baja toxicidad y biocompatibilidad con un amplio rango de moléculas y polímeros (Rahman & Padevettan, 2012) pueden actuar como nano acarreadores para diferentes agroquímicos gracias a su propiedad meso porosa (Cáceres *et al.*, 2019; Rastogi *et al.*, 2019) además posee variadas aplicaciones dado su forma, porosidad y cristalinidad, permiten que sea precisamente manipulado y adaptarlo a las nanoformulaciones para la entrega precisa de biopesticidas (Barik *et al.*, 2008).

2.7.1 Antecedentes de nanopartículas de dióxido de silicio en granos almacenados.

Las nanopartículas de dióxido de silicio han sido empleadas en variedad de especies de insectos plaga de granos almacenados por ejemplo contra *S. oryzae* donde se registró una buena respuesta, logrando hasta el 96 % de control efectivo (Debnath *et al.*, 2011). Se ha documentado que actúan como efectivos sistemas de entrega del ingrediente activo, como el caso de clorpirifos contra *R. dominica* y *T. castaneum* (Babamir-Satehi *et al.*, 2017). El control efectivo de *R. dominica* con nanopartículas en combinación con aceite esencial de *Alstonia scholaris* (Kallur & Patil, 2019). Se ha registrado su empleo con mortalidad de hasta 100 % en el caso de *S. granarius* (Rouhani *et al.*, 2019). Ziaee & Ganji (2016) determinaron que las nanopartículas de dióxido de silicio representan una opción efectiva en el manejo de *T. castaneum* y *R. dominica* en granos almacenados de trigo obteniendo mortalidades de hasta 97 % y 100 %. Las nanopartículas de dióxido de silicio pueden ser combinadas con tierra de diatomeas para mejorar su efectividad en el control de coleópteros de granos almacenados, tales como *T. confusum* y *R. dominica*, donde los

tratamientos de tierra de diatomeas en combinación con nanopartículas de dióxido de silicio incrementaron las mortalidades hasta 86% y 99%, respectivamente para las especies involucradas en el estudio (Saed *et al.*, 2022). Se ha reportado que el empleo de aerogel con nanopartículas de SiO₂ puede causar mortalidades de hasta 100 % en *C. maculatus*, *R. dominica* y *S. oryzae*, así como tener efectos de reducción de la progenie F1 (Doaa & Nilly, 2015).

Otras investigaciones donde se ha documentado la efectividad de las nanoformulaciones con dióxido de silicio para la protección de productos almacenados incluyen *Trogoderma granarium* y *Stegobium paniceum* (Abdelaffatah & zein, 2019), *C. maculatus* y *T. castaneum* (Annon *et al.*, 2020), *C. maculatus*, *R. dominica* y *T. castaneum* (Salem, 2020), *Oryzaephilus surinamensis* (Zahran & Sayed, 2021).

2.7.2 Modo de acción de las nanopartículas de dióxido de silicio.

De acuerdo con diversos autores las nanopartículas de dióxido de silicio actúan mediante la unión a la cutícula del insecto, a través de un mecanismo llamado fisisorción o fisiosorción, en el cual éstas son fisiosorbidas por los lípidos cuticulares de los insectos, causando daños mayores a la capa de ceras que protege a los insectos de la desecación, primeramente con el daño mecánico para posteriormente causar la muerte del insecto por la correspondiente pérdida de agua (Barik *et al.*, 2008; Debnath *et al.*, 2011; Arumugam *et al.*, 2016; Zahran & Sayed, 2021).

Materiales y métodos.

3.1 Ubicación del experimento.

La presente investigación se realizó en el Laboratorio de Toxicología del Departamento de Parasitología Agrícola de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), Saltillo, Coahuila.

3.2 Obtención y mantenimiento de colonias de insectos

Las colonias fueron obtenidas de las ya existentes en el Departamento de Parasitología agrícola de la UAAN, mismas que se encontraban libres de aplicación de insecticida, previa identificación fueron colocados en cámaras bioclimáticas para su establecimiento y reproducción, como sigue:

3.2.1 *T. castaneum* H.

Se colocaron 500 adultos por cada Kg de harina de trigo. Se mantuvo a una temperatura de 35 °C, con una humedad relativa de 40 % -50 % y fotoperiodo 12:12 (L:O).

3.2.2 *R. dominica* F.

Se colocaron 500 adultos por cada Kg de grano de maíz. Se mantuvo a una temperatura de 28 °C, con una humedad relativa de 65 % y fotoperiodo 12:12 (L:O)

3.2.3 *S. zeamais* M.

Se colocaron 500 adultos por cada kg de maíz. Se mantuvo a una temperatura de 35 °C, con una humedad relativa de 65 % y fotoperiodo 12:12 (L:O).

3.3 Extractos vegetales y concentraciones evaluadas.

Se evaluaron 8 extractos* comerciales, en su versión solos y con nanopartículas: Higuer ®, Higuer Nano ®, Haarp ®, Haarp Nano ®, Azeem ®, Azeem Nano ®, Etos ® y Etos Nano ®, de cada producto se evaluaron 6 concentraciones para cada especie de insecto. La función de cada producto es como se muestra en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Función de cada uno de los extractos evaluados.

Extracto nombre comercial	Función
Azeem ®	Insecticida
Azeem Nano®	
Higuer ®	Insecticida-acaricida
Higuer Nano®	
Haarp ®	Nematicida
Haarp Nano®	
Etos ®	Insecticida
Etos Nano®	

Para cada uno de los extractos se establecieron 6 concentraciones, previo estudio de ventana biológica para cada especie de insecto; con intervalos utilizados tal como se muestra en los Cuadros 2, 3 y 4.

Cuadro 2. Rango de concentraciones evaluadas para cada extracto sobre *T. castaneum*.

Especie de insecto	Extracto evaluado	Rango de concentraciones (ppm)
<i>T. castaneum</i>	Azeem ®	1-300
	Azeem Nano®	1-1000
	Higuer®	1-300
	Higuer Nano®	1-300
	Haarp®	1-300
	Haarp Nano®	1-500
	Etos ®	1-1000
	Etos Nano ®	1-1000

Ppm = Partes por millón.

*Los productos comerciales Higuer ®, Higuer Nano ®, Haarp ®, Haarp Nano ®, Azeem ®, Azeem Nano ®, Etos ® y Etos Nano ® fueron proporcionados por la empresa CULTA S.A. de C.V.

Cuadro 3. Rango de concentraciones evaluadas para cada extracto sobre *R. dominica*.

Especie de insecto	Extracto evaluado	Rango de concentraciones (ppm)
<i>R. dominica</i>	Azeem ®	1-1000
	Azeem Nano®	1-2500
	Higuer®	1-3000
	Higuer Nano®	0.5-500
	Haarp®	0.5-300
	Haarp Nano®	1-1500
	Etos ®	1-3000
	Etos Nano ®	1-4500

Ppm = Partes por millón.

Cuadro 4. Rango de concentraciones evaluadas para cada extracto sobre *S. zeamais*.

Especie de insecto	Extracto evaluado	Rango de concentraciones (ppm)
<i>S. zeamais</i>	Azeem ®	1-600
	Azeem Nano®	1-450
	Higuer®	0.5-450
	Higuer Nano®	0.5-450
	Haarp®	0.5-450
	Haarp Nano®	0.5-450
	Etos ®	1-600
	Etos Nano ®	1-600

Ppm = Partes por millón.

3.4 Bioensayo.

Para la evaluación del efecto insecticida se empleó la técnica de película residual (FAO, 1974); evaluando la mortalidad a las 24, 48 y 72 horas y se consideró como criterio de muerte aquellos individuos que no respondieron al estímulo de calor. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con 6 tratamientos y un testigo, con 3 repeticiones cada uno, colocándose 30 insectos por unidad experimental. A los datos obtenidos de los conteos se les realizó la corrección de mortalidad mediante la fórmula de Abbott (1925).

3.5 Análisis estadístico.

Una vez aplicada la corrección de mortalidad, los resultados obtenidos se sometieron a un Análisis Probit (Finney, 1971), con la finalidad de obtener la curva de respuesta concentración- mortalidad y realizar la estimación de la CL_{50} , para ello se empleó el programa estadístico SAS System for Windows 9.0.

Resultados y discusión

Procesados los datos, se obtuvo las estimaciones de la CL_{50} para los extractos evaluados en las tres especies de insectos, tal como se muestra en los Cuadros 5, 6 y 7.

Para *S. zeamais* Todos los extractos con nanopartículas mostraron valores menores de CL_{50} que los extractos solos. (Cuadro7).

Se observó que para *T. castaneum* dos de los extractos evaluados, con nanopartículas, presentaron un valor menor de CL_{50} respecto de los extractos solos; Higuer Nano® y Etos Nano® presentaron valores de 98.25 ppm y 291.92 ppm, respectivamente; sin embargo, los extractos solos Higuer® y Etos® sus valores fueron menores en relación a los que contenían nanopartículas con 196.35 ppm y 519.66 ppm respectivamente (Cuadro 5).

Cuadro 5. Determinación de la concentración letal media, límites fiduciales al 95 % de confianza y ecuación de predicción para *T. castaneum*.

Especie de insecto	Extracto	N	CL_{50} (ppm)	LFI-LFS	Ecuación de predicción
<i>T. castaneum</i>	Azeem®	30	340.30	298.59 - 381.07	$Y = -9.1021 \pm 3.5950$
	Azeem Nano®	30	719.89	664.08 - 776.65	$Y = -14.3966 \pm 5.0385$
	Higuer®	30	196.35	37.88 - 504.62	$Y = -3.9140 \pm 1.7068$
	Higuer Nano®	30	98.25	45.28 - 196.73	$Y = -5.6527 \pm 2.4384$
	Haarp®	30	288.85	276.98 - 302.14	$Y = -29.7759 \pm 12.1006$
	Haarp Nano®	30	306.75	263.98 - 348.24	$Y = -9.1895 \pm 3.6953$
	Etos®	30	519.66	441.39 - 608.87	$Y = -5.9408 \pm 2.2419$
	Etos Nano®	30	291.92	243.29 - 344.78	$Y = -6.1078 \pm 2.4775$

N= tamaño de la población, CL_{50} = concentración letal media, ppm= partes por millón, LFI=límite fiducial inferior, LFS=límite fiducial superior

Cuadro 6. Determinación de la concentración letal media, límites fiduciales al 95 % de confianza y ecuación de predicción para *R. dominica*.

Especie de insecto	Extracto	N	CL ₅₀ (ppm)	LFI-LFS	Ecuación de predicción
<i>R. dominica</i>	Azeem®	30	153.22	41.35 - 895765	Y= -3.3172±1.5179
	Azeem Nano®	30	211.83	0.3419 - 2639	Y=-3.3026 ±1.4198
	Higuer ®	30	190.05	157.50 - 225.52	Y=-12.0853 ±5.3032
	Higuer Nano®	30	282.98	180.19 - 612.71	Y= -8.0332±3.2765
	Haarp®	30	249.18	140.12 - 1616	Y=-4.3065 ±1.7970
	Haarp Nano®	30	401.13	310.75 - 662.28	Y=-10.0325 ±3.8538
	Etos ®	30	153.31	0.9727 - 7300	Y=-2.4092 ±1.1023
	Etos Nano®	30	397.29	137.96 - 684.48	Y= -8.9962±3.4612

N= tamaño de la población, CL₅₀= concentración letal media, ppm= partes por millón, LFI=límite fiducial inferior, LFS=límite fiducial superior

Cuadro 7. Determinación de la concentración letal media, límites fiduciales al 95 % de confianza y ecuación de predicción para *S. zeamais*.

Especie de insecto	Extracto	N	CL ₅₀ (ppm)	LFI-LFS	Ecuación de predicción
<i>S. zeamais</i>	Azeem®	30	225.68	208.21 - 242.13	Y= -13.0262±5.5305
	Azeem Nano®	30	180.45	125.51 - 236.28	Y=-9.6174±4.2623
	Higuer ®	30	91.40	74.59 - 106.19	Y=-6.222±3.1731
	Higuer Nano®	30	57.48	32.96 - 84.62	Y=-3.9956±2.2708
	Haarp®	30	187.60	132.12 - 245.93	Y=-10.2442±4.5064
	Haarp Nano®	30	80.75	2.39 - 176.10	Y=-4.1859±2.1948
	Etos ®	30	122.63	21.01 - 233.97	Y=-4.0519±1.9400
	Etos Nano®	30	41.16	8.95 - 101.61	Y=-2.2897±1.4181

N= tamaño de la población, CL₅₀= concentración letal media, ppm= partes por millón, LFI=límite fiducial inferior, LFS=límite fiducial superior

Algunas investigaciones mencionan las bondades del empleo de nanopartículas de dióxido de silicio como la reportada por El-Naggar *et al.* (2020), donde muestran la efectividad en el control sobre *T. castaneum* con nanopartículas de dióxido de silicio. Yang *et al.* (2009) indican que el empleo de nanopartículas cargadas con aceite esencial de ajo fue efectivo para el control de *T. castaneum*, dicho control por las nanopartículas después de 5 meses fue de 80 %, en comparación con el aceite esencial libre que fué de 11 %. Así mismo, Abdel-Halim y Attia, (2018) reportan el empleo de nanopartículas de silicio cargadas con aceite esencial de clavo y pimienta contra *T. castaneum*, donde la formulación de nanopartículas y clavo fué más tóxica que el aceite de clavo solo, con valores de CL_{50} de 1156.26 y 5619.03 ppm, respectivamente; mientras que para la formulación de pimienta y aceite esencial solo, los valores de la CL_{50} fueron 486.63 y 494.35 ppm. Por su parte, Babamir-Satehi *et al.* (2017), demostraron la efectividad de nanopartículas de silicio cargadas con clorpirifos en el control de *T. castaneum* destacando que las nanopartículas actuaron como efectivos sistemas de entrega del ingrediente activo al mejorar la estabilidad y la liberación de manera controlada.

En ésta investigación, dos de los extractos sin nanopartículas evaluados sobre *T. castaneum*, Azeem® y Haarp® mostraron valores de CL_{50} de 340.30 ppm y 288.85 ppm respectivamente, menores que los productos con nanopartículas, Azeem Nano® con 719.89 ppm y Haarp Nano® con 306.75 ppm; en un estudio realizado por Haroun *et al.* (2020), se evaluaron nanopartículas de dióxido de silicio encontrándose que a las concentraciones más altas (2, 0.3 y 8 g / Kg) la mortalidad fué de 98.3, 98 y 57 %, respectivamente sobre *Sitophilus oryzae*, *Callosobruchus maculatus* y *T. castaneum*, indicando que de las tres especies fue *T. castaneum* la que mostró elevada resistencia. Dado que el modo de acción de las nanopartículas de dióxido de silicio, conocido como fisisorción, donde las nanopartículas son fisio-sorbidas por los lípidos cuticulares, causando daño y desecación (Athanassiou *et al.*, 2018), efecto comparable al de la tierra de diatomeas, empleada para el control de insectos plaga de alimentos (Kavallieratos, *et al.*, 2018). En este sentido Doumbia *et al.*, (2014) investigaron el control de la tierra de diatomeas sobre *Palorus subdepressus*, *S. zeamais* y *T. castaneum* encontraron que los primeros dos fueron más susceptibles, alcanzando mortalidades de 100 % a los 7 y 4 días, respectivamente mientras que *T. castaneum* logró dicho porcentaje hasta los 14 días. Los

autores refieren que la mayor sensibilidad de *S. zeamais* y *P. subdepressus* se podría deber a la estructura cuticular más áspera que la de *T. castaneum*, ya que por su morfología es capaz de retener mayor cantidad partículas. Barlett (1951) citado por Doumbia *et al.* (2014) mencionan que aquellos insectos con una cutícula más gruesa, como es el caso de *T. castaneum* comparado con *S. zeamais*, reducen las posibilidades de perforación por partículas abrasivas. Estas observaciones podrían explicar los resultados obtenidos para *T. castaneum* con los extractos Azeem nano® y Haarp Nano®, con valores más altos de CL₅₀ que los mismos extractos solos.

Con *R. dominica*, los extractos sin nanopartículas presentaron valores de CL₅₀ menores que los productos con nanopartículas (Cuadro 6). Otitodun *et al.* (2015) evaluaron tratamientos de polvo de semillas de *Dennettia tripetala* y *Piper guineense*, tierra de diatomeas y arena de río, así como las combinaciones de polvos botánicos con los dos últimos sobre *S. oryzae* y *R. dominica*, notando que la segunda fue más tolerante a los tratamientos con tierra de diatomeas, aludiendo que la baja movilidad del insecto puede ser un factor que resulta en el reducido contacto entre la cutícula y las partículas. Nwuabani *et al.* (2014) concluyeron que *R. dominica* presentaba mayor tolerancia a la tierra de diatomeas que *S. oryzae*, indicando como potencial explicación las diferencias taxonómicas en la naturaleza de la cutícula de los insectos, lo que causaría la pérdida de agua en distintas proporciones aunado a la baja movilidad. Dichas observaciones sobre las tres especies de insectos podrían, en parte, explicar los datos de esta investigación, puesto que otro factor a tomar en cuenta está constituido por los lípidos cuticulares de los insectos, mismos que cumplen dos funciones fundamentales: la protección contra la desecación y su papel como moléculas de señalización en un amplio rango de sistemas de comunicación química, formando mezclas de compuestos que varían considerablemente entre los diferentes taxones (Holze *et al.* 2021; Sprenger & Menzel, 2020). Así pues, suponemos que la interacción extracto-nanopartículas con la cutícula del insecto (fisorción) puede variar. Alnajim *et al.* (2019), realizaron la identificación de los lípidos cuticulares de *R. dominica* y *T. castaneum*, encontrando una mayor proporción de ceras con alto punto de ebullición que aquellas con bajo punto, en *R. dominica*; mientras que en *T. castaneum* lo contrario. El rango de los hidrocarburos identificados osciló entre 25 (pentacosano) a 32 (dotriacontano) para *T. castaneum* y de 26 (11-metilpentacosano) a 34

(tetracontano) para *R. dominica*, siendo los compuestos mayoritarios de la extracción cuticular para *T. castaneum*, 11-metilheptacosano (20.71 %), 3-metilheptacosano (12.37 %) y 1-pentadeceno (10.98 %); mientras que para *R. dominica* fueron 10-metildotriacontano (14.0 %), 15-metiltritriacontano (9.93 %) y 13-metilheptacosano (7.52 %), agrupándose como n-Alcanos y alcanos metil-ramificados para ambos insectos. Un estudio realizado por Baker *et al.* (1983) describe a los hidrocarburos cuticulares de *S. zeamais* como olefinas principalmente, donde aquellos con mayor proporción fueron n-alcadienos (57.2%), n-alcanos (26.6%) y n-alquenos (15.1 %). De acuerdo con Menzel *et al.* (2017) los grupos de hidrocarburos cuticulares que brindan mejores características de impermeabilidad son n-alcanos y mono metil alcanos. Caso contrario ocurre con n-alquenos, alcadienos y alquenos metil-ramificados. Brooks *et al.* (2015), mencionaron que los hidrocarburos pertenecientes a las clases n-alcanos y mono metil alcanos, comparadas con los metil-ramificados o insaturados; se agregan más fuertemente a nivel molecular debido a fuerzas de Van der Waals, y que dicho efecto aumenta conforme lo hace la longitud de cadena, brindando mayor rigidez. Gibbs & Rajpurohit, (2010) indicaron que la presencia de varios radicales metil y especialmente las insaturaciones en la cadena de los hidrocarburos inducen desorden en la capa epicuticular reduciendo la agregación molecular, clasificándose éstas, como características disruptivas de la agregación molecular de los hidrocarburos cuticulares (Cvačka *et al.*, 2006; Menzel *et al.*, 2017). En este trabajo de investigación se observó que *S. zeamais* fué más sensible a los extractos con nanopartículas, se considera que la agregación entre los hidrocarburos cuticulares podría influir en la interacción con las nanopartículas de dióxido de silicio, favorecida por la naturaleza de los lípidos cuticulares de *S. zeamais*, mientras que, para *R. dominica* y *T. castaneum* el proceso de fisiosorción podría ser más complejo, pues los lípidos cuticulares se encontrarán fuertemente agregados y presentarían mejor capacidad de impermeabilización de la cutícula.

Ferveur *et al.* (2018) en individuos de *Drosophila melanogaster* explican que existe una relación compleja entre la resistencia a la desecación, el perfil lipídico de la cutícula y el contenido de agua, demostrando que se trata de una serie de procesos complejos que relacionan estas tres características físicas y la expresión genética del insecto. De acuerdo a los resultados registrados en los Cuadros 5,6 y 7 se considera que, dado el mecanismo

de acción de las nanopartículas de dióxido de silicio, denominado fisiosorción, se ve afectado por la agregación molecular de los diferentes tipos de lípidos cuticulares presentes en los insectos bajo estudio, ya que estos se encuentran agrados por fuerzas de Van der Waals, interfiriendo posiblemente con el proceso de fisiosorción de las nanopartículas de los extractos. Mientras que las olefinas, mayoritarias en *S. zeamais*, poseen características disruptivas (insaturaciones y radicales metil) de la agregación molecular entre lípidos, el proceso de fisiosorción se llevaría a cabo de mejor manera.

Al término del estudio fue posible observar que, de las tres especies, *S. zeamais* obtuvo valores menores de CL_{50} para todos los extractos con nanopartículas evaluados, de los cuales Etos Nano® obtuvo el valor menor con 41.18 ppm.

Sobre *T. castaneum*, dos de los extractos con nanopartículas mostraron valores de CL_{50} menores que los productos solos (Higuer Nano® y Etos Nano®) y dos extractos solos (Azeem® y Haarp®) valores de CL_{50} menores que los productos con nanopartículas.

Por último, para *R. dominica* todos los extractos solos evaluados mostraron valores de CL_{50} menores que los productos con nanopartículas.

Conclusiones.

Los extractos evaluados, con nanopartículas, son una opción viable para el control de *S. zeamais*.

Para *T. castaneum* las mejores alternativas de manejo están representadas por los extractos Higer Nano® y Etos Nano® dados los valores obtenidos de CL₅₀.

En el caso de *R. dominica* Azeem® y Etos® presentaron los valores de CL₅₀ menores. Mientras que todos los productos con nanopartículas presentaron valores de CL₅₀ superiores a los extractos solos.

Considerando la respuesta de los insectos bajo estudio, esta podría estar influenciada según la etología de cada insecto, su morfología, así como las características cuticulares y la interacción con las nanopartículas de dióxido de silicio presentes en los extractos.

Referencias.

- Abbott, W.S. (1925). A method of computing the effectiveness of an insecticide. *Journal of Economic Entomology*, 18, 265-267. <http://dx.doi.org/10.1093/jee/18.2.265a>
- Abdelfattah, N., A., & Zein, D., M. Biological studies and toxicity experiments of AEROSIL 200 nanoparticles on adults and larvae of some stored grain insects. *International Journal of Entomology Research*, 4(1), 103-108.
- Abdel-Halim, K.Y. & Attia, M.A. (2018). Toxicity of certain essential oils loaded on silica nanoparticles against *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) adults. *Egyptian Journal of Plant Protection Research Institute*, 1(1), 19-31.
- Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de Mercados Agropecuarios. (2018). Almacenamiento y conservación de granos y semillas. Consultado el 14 de mayo de 2022. <https://www.gob.mx/aserca/articulos/almacenamiento-y-conservacion-de-granos-y-semillas>
- Agricultural Market Information System of the G20. (2021). Grain storage and global Food security. Consultado el 04 de abril de 2022. http://www.amis-outlook.org/fileadmin/user_upload/amis/docs/resources/Grains_Storage_and_Global_Food_Security.pdf
- Ahmad, F., Ridley, A. W., Daglish, G. J., Burrill, P. R., & Walter, G. H. (2013). Response of *Tribolium castaneum* and *Rhyzopertha dominica* to various resources, near and far from grain storage. *Journal of Applied Entomology*, 137(10), 773-781. <https://doi.org/10.1111/jen.12065>
- Alnajim, I., Du, X., Lee, B., Agarwal, M., Liu, T. y Ren, Y. (2019). New method of analysis of lipids in *Tribolium castaneum* (Herbst) and *Rhyzopertha dominica* (Fabricius) insects by direct immersion solid-phase microextraction (DI-SPME) coupled with GC-MS. *Insects*, 10(10), 363. <https://doi.org/10.3390/insects10100363>
- Annon, M.R. & Jafar, F. S. (2020). “The effectiveness of silver and silica nanoparticles on productivity and adult emergence of *T. castaneum* and *C. maculatus*,” in *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1664, 1st International Virtual Conference on Pure Science 10th -11th June 2020, College of Science, University of Al-Qadisiyah, Iraq (IOP Publishing),
- Arumugam, G., Velayutham, V., Shanmugavel, S., & Sundaram, J. (2016). Efficacy of nanostructured silica as a stored pulse protector against the infestation of bruchid beetle, *Callosobruchus maculatus* (Coleoptera: Bruchidae). *Applied nanoscience*, 6(3), 445-450. <https://doi.org/10.1007/s13204-015-0446-2>

- Asrar, M., Ashraf, N., Hussain, S.M., Zia, K. & Rasool, B. (2016). Toxicity and repellence of plant oils against *Tribolium castaneum* (Herbst), *Rhyzopertha dominica* (F.) and *Trogoderma granarium* (e). *Pakistan Entomologist*, 38(1), 55-63.
- Athanassiou, C., G., Hasan, M., M., Phillips, T., W., Aikins, M., J. & Throne, J., E. (2015). Efficacy of methyl bromide for control of different life stages of stored-product psocids. *Journal of economic entomology*, 108(3), 1422-1428. <https://doi.org/10.1093/jee/tov069>
- Athanassiou, C.G., Kavallieratos, N.G., Benelli, G., Losic, D., Usha Rani, P. y Desneux, N. (2018). Nanoparticles for pest control: current status and future perspectives. *Journal of Pest Science*. 91(1): 1-15. <https://doi.org/10.1007/s10340-017-0898-0>
- Attia, M.A., Wahba, T.F., Shaarawy, N., Moustafa, F.I., Guedes, R.N.C. & Dewar, Y. (2020). Stored grain pest prevalence and insecticide resistance in Egyptian populations of the red flour beetle *Tribolium castaneum* (Herbst) and the rice weevil *Sitophilus oryzae* (L.). *Journal of Stored Products Research*, 87. 101611. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2020.101611>
- Babamir-Satehi, A., Ziaee, M., & Ashrafi, A. (2017). Synthesis and toxicological evaluation of silinica nanoparticles as Chlorpyrifos carrier against the beetle pests *Rhyzopertha dominica* and *Tribolium castaneum*. *Journal of Entomological Society of Iran*, 37(2), 235-247.
- Baker, J.E., Woo, S.M., Nelson, D.R. & Fatland, C.L. (1984). Olefins as major components of epicuticular lipids of three Sitophilus weevils. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Comparative Biochemistry*. 77(4): 877-884. [https://doi.org/10.1016/0305-0491\(84\)90327-4](https://doi.org/10.1016/0305-0491(84)90327-4)
- Barik, T., K., Sahu, B., & Swain, V. (2008). Nanosilica: from medicine to pest control. *Parasitology research*, 103(2), 253-258. <https://doi.org/10.1007/s00436-008-0975-7>
- Barlett, B.R. (1951). The action of certain inert dust materials on parasitic Hymenoptera. *Journal of Economic Entomology*. 44(6), 891-896. <https://doi.org/10.1093/jee/44.6.891>
- Benelli, G. (2018). Mode of action of nanoparticles against insects. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(13), 12329-12341. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1850-4>
- Brooks, L., Brunelli, M., Pattison, P., Jones, G & Fitch, A. (2015). Crystal structures of eight mono-methyl alkanes (C26-C32) via single-crystal and powder diffraction and DFT-D optimization. *IUCrJ*. 2(5), 490-497. <https://doi.org/10.1107/s2052252515010271>
- Cáceres, M., Vassena, C. V., Garcerá, M. D., & Santo-Orihuela, P., L. (2019). Silica nanoparticles for insect pest control. *Current Pharmaceutical Design*, 25(37), 4030-4038. <https://doi.org/10.2174/1381612825666191015152855>

- Campbell, A., & Sinha, R., N. (1976). Damage of wheat by feeding of some stored product beetles. *Journal of Economic Entomology*, 69(1), 11-13. <https://doi.org/10.1093/jee/69.1.11>
- Cano-Sarabia M., & Maspoch D. (2016) Nanoencapsulation. In: Bhushan B. (eds) *Encyclopedia of Nanotechnology*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9780-1_50
- Chen, Z., Schlipalius, D., Opit, G., Subramanyam, B. & Philips, T.W. (2015). Diagnostic molecular markers for phosphine resistance in U.S. populations of *Tribolium castaneum* and *Rhyzopertha dominica*. *PLoS One*. 10(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0121343>
- Cinco-Moroyoqui, F., J., Díaz-Malvárez, F., I., Barrón-Hoyos, J., M., Cárdenas-López, J., L., Cortez-Rocha, M., O., & Wong-Corral, F., J. (2008). Isolation and partial characterization of three isoamylases of *Rhyzopertha dominica* F. (Coleoptera: Bostrichidae). *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 150(2), 153-160. <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2008.02.008>
- Corrêa, A. S., Vinson, C. C., Braga, L. S., Guedes, R. N. C. & De Oliveira, L. O. (2016). Ancient origin and recent range expansion of the maize weevil *Sitophilus zeamais*, and its genealogical relationship to the rice weevil *S. oryzae*. *Bulletin of Entomological Research*, 107(1), 9-20. <https://doi.org/10.1017/S0007485316000687>
- Cvačka, J., Jiroš, P., Šobotník, J., Hanus, R. & Svatoš, A. (2006). Analysis of insect cuticular hydrocarbons using matrix-assisted laser desorption / ionization mass spectrometry. *Journal of chemical ecology*. 32(2): 409-434. <https://doi.org/10.1007/s10886-005-9008-5>
- De Andrade Melo Junior, J.L, da Silva, J.A., Santoro, K.R. & Badji, C.A. (2018). Insecticide resistance of corn weevil populations from semi-arid regions. *Australian Journal of Crop Science*, 12(3), 430-434.
- de Lira, C. S., Pountual, E., V., de Albuquerque, L., P., Paiva, L., M., Paiva, P., M., de Oliveira, J., V., ... & Navarro, D., M., D., A., F. (2015). Evaluation of the toxicity of essential oil from *Alpinia purpurata* inflorescences to *Sitophilus zeamais* (maize weevil). *Crop Protection*, 71, 95-100. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.02.004>
- Debnath, N., Das, S., Seth, D., Chandra, R., Bhattacharya, S. C. & Goswami, A. (2011). Entomotoxic effect of silica nanoparticles against *Sitophilus oryzae* (L.). *Journal of Pest Science*, 84 (1), 99–105. <https://doi.org/10.1007/s10340-010-0332-3>
- Deshwal, R., Vaibhav, V., Kumar, N., Kumar, A. & Singh, R. (2020). Stored grain pests and their management: An overview. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 8(5), 969-974.
- Devi, S. R., Thomas, A., Rebijith, K. B. & Ramamurthy, V. V. (2017). Biology, morphology and molecular characterization of *Sitophilus oryzae* and *S. zeamais*

- (Coleoptera: Curculionidae). *Journal of Stored Products Research*, 73, 135-141. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2017.08.004>
- Doaa, M. B., & Nilly, A. H. (2015). Entomotoxic effect of Aerosil 200 Nano Particles against three main stored grain insects. *International Journal of Advanced Research*, 3(8), 1371-1376.
- Doumbia, M., Douan, B.G., Kwadjo, K.E., Kra, D.K., Martel, V. & Dagnogo, M. (2014). Effectiveness of diatomaceous earth for control of *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae), *Tribolium castaneum* and *Palorus subdepressus* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Journal of Stored Products Research*. 57,1-5. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jspr.2013.11.008>
- Duehl, A. J., Arbogast, R. T., & Teal, P., E. (2011). Density-related volatile emissions and responses in the red flour beetle, *Tribolium castaneum*. *Journal of chemical ecology*, 37(5), 525-532. <https://doi.org/10.1007/s10886-011-9942-3>
- Edde, P.A.A. (2012). Review of the biology and control of *Rhyzopertha dominica* (F.) the lesser grain borer. *Journal of Stored Products Research*. 48 :1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2011.08.007>
- El-Naggar, M.E., Abdesalam, N.R., Fouda, M.M.G, Mackled, M.I., Al-Jaddadi, M.A.M, Ali, H.M, Siddiqui, M.H. & Kandil, E.E. (2020). Soil application of nano silica on maize yield and its insecticidal activity against some stored insects after the post-harvest. *Nanomaterials*. 10:719. <https://doi.org/10.3390/nano10040739>
- Evans, D., A. (1981). The biology of stored products Coleoptera. In: Champ, B.R., Highley, E. (Eds.), Proceedings of the Australian Development Assistance Course on the Preservation of Stored Cereals. CSIRO Division of Entomology, Canberra, pp. 149e185
- Ferverur, J.F., Cortot, J., Rihani, K., Cobb, M. & Everaerts, C. (2018). Desiccation resistance: effect of cuticular hydrocarbons and wáter content in *Drosophila melanogaster* adults. *Peerj*. 6: e4318.
- Finney, D.J. (1971). Probit Analysis. 3rd edition. Cambridge University Press. Grant Britain.
- Flinn, P., W., Hagstrum, D., W., Reed, C. & Phillips, T., W. (2010). Insect population dynamics in commercial grain elevators. *Journal of Stored Products Research*, 46(1), 43-47. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2009.09.001>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1974). Métodos provisionales para la detección y medición de la resistencia de plagas agrícolas a los plaguicidas. Boletín Fitosanitario de la FAO. 101-107. Roma, Italia.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. Insect Damage: damage on post-harvest. (2000). Consultado el 15 de mayo de 2022. <https://www.fao.org/3/av013e/av013e.pdf>

- Food and Agriculture Organization of the United Nations. The future of Food and agricultura-trends and challenges. (2017). Consultado el 12 de mayo de 2022. <https://www.fao.org/3/i6583e/i6583e.pdf>
- García-Lara, S., Espinosa Carrillo, C. y Bergvinson, D. J. (2007). *Manual de plagas en granos almacenado y tecnologías alternas para su manejo y control*. CIMMYT.
- Gibbs, A.G. & Rajpurohit, S. Blomquist, G.J. y Bagneres, A.G. (ed.) (2010). Cuticular lipids and wáter balance. In : *Insect hydrocarbons: biology, chemistry and chemical ecology.*, pp 100-120. Cambridge University Press. Cambridge, U.K.
- Giga, D. P., Mutemerewa, S., Moyo, G. & Neeley, D. (1991). Assessment and control of losses caused by insect pests in small farmers' stores in Zimbabwe. *Crop Protection*, 10(4), 287-292. [https://doi.org/10.1016/0261-2194\(91\)90007-E](https://doi.org/10.1016/0261-2194(91)90007-E)
- Golden, G., Quinn, E., Shaaya, E., Kostyukovsky, M. & Poverenov, E. (2018). Coarse and nano emulsions for effective delivery of the natural pest control agent pulegone for stored grain protection. *Pest management science*. 74(4), 820-827. <https://doi.org/10.1002/ps.4787>
- González, J., Arregoces, O., Hernández, R., & Parada, O. (1983). Insectos y ácaros plagas y su control en el cultivo de arroz en América Latina. *Federación Nacional de Arroceros, Bogotá, Colombia*.
- Gutiérrez Díaz, L. J. (1990). *Insectos que infestan los granos y productos almacenados: listado de especies reportadas a nivel mundial* (No. Folleto 12937).
- Haroun, S.A., Elnaggar, M.E., Zein, D.M. & Gad, R.I. (2020). Insecticidal efficiency of zinc oxide and hydrophilic silica nanoparticles against some stored seed insects. *Journal of Plant Protection Research*. 60(1), 77-85.
- Hasan, D., M., Aikins, M., J., Schilling, M., W. & Phillips, T., W. (2020). Comparison of Methyl Bromide and Phosphine for Fumigation of *Necrobia rufipes* (Coleoptera: Cleridae) and *Tyrophagus putrescentiae* (Sarcoptiformes: Acaridae), Pests of High-Value Stored Products. *Journal of Economic Entomology*, 113, (2), 1008–1014. <https://doi.org/10.1093/jee/toz319>
- Hayat, K., Afzal, M., Aqueel, M.A., Ali, S., Khan, Q. M. & Ashfaq, U. (2018). Determination of insecticide residues and their adverse effects on blood profile of occupationally exposed individuals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 163. 382-390. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.07.004>
- Hernández, G.A. y Carballo Carballo, A. (2014). Almacenamiento y conservación de granos y semillas, Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca, y Alimentación, Subsecretaría de Desarrollo Rural (Sagarpa). Montecillo, Texcoco, México.
- Hernández-Tenorio, F. y Orozco-Sánchez, F. (2019). Nanoformulaciones de bioinsecticidas botánicos para el control de plagas agrícolas. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 91(1), 72-91. <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v9n1.81401>

- Holze, H., Schrader, L. & Buellesbach J. (2021). Advances in deciphering the genetic basis of insect cuticular hydrocarbon biosynthesis and variation. *Heredity*. 126(2), 219-234. <https://doi.org/10.1038/s41437-020-00380-y>
- Huang, L., Yang, S., Chen, J., Tian, J., Huang, Q. Huang, H., ... & Wei, Y. (2019). A facile Surface modification strategy for fabrication of fluorescent silica nanoparticles with the aggregation-induced emission dye through Surface-initiated cationic ring opening polymerization. *Materials Science Engineering, C* (94): 270-278. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.09.042>
- Ibrahim, A. (2015). Farmers' practices and combinations of Malathion and neem seed powder management options on stored sorghum and maize insect pests at Bako, West Shoa, Ethiopia. *Science, Technology and Arts Research Journal*, 4(1), 50-56. <https://doi.org/10.4314/star.v4i1.7>
- International Grains Council (2022). Índice de granos y semillas. Consultado el 28 de marzo de 2022 de <https://www.igc.int/en/default.aspx>
- Jasrotia, P., Kashyap, P. L., Bhardwaj, A. K., Kumar, S. & Singh, G. P. (2018). Scope and applications of nanotechnology for wheat Production: a review of recent advances. *Wheat Barley Research*. 10 (1): 1–14. doi:10.25174/2249-4065/ 2018/76672
- Jasrotia, P., Nagpal, M., Mishra, C.N., Sharma, A.K., Kumar, S., Kamble, U., ... & Singh, G.P. (2022). Nanomaterials for post-harvest management of insect pests: current state and future perspectives. *Frontiers in Nanotechnology*. 3: 811056.
- Jayas, D. S., White, N. D., & Muir, W., E. (Eds.). (1994). *Stored-grain ecosystems* (Vol. 39). CRC Press.
- Jayas, D.S. (2012). Storing Grains for Food security and sustainability. *Agricultural Research*, 1(1), 21-24. <https://doi.org/10.1007/s40003-011-0004-4>
- Kallur, R., & Patil, S. (2019). To evaluate the effect of Pesticide activity of of nanoformulations of *Alstonia scholaris*, against pest-*Rhyzopertha dominica* using HPLC and Fourier transform infrared (FT-IR) spectra analysis. *International Journal*, 2(3), 294. <https://doi.org/10.1007/s00436-008-0975-7>
- Kashyap, P. L., Kumar, S., Jasrotia, P., Singh, D. P. & Singh, G. P. (2020). "Nanotechnology in wheat production and protection,". *Environmental Nanotechnology*. 4. 165–194. doi:10.1007/978-3-030-26668-4_5
- Kavallieratos, N.G., Athanassiou, C.G., Peteinatos, G.G., Boukouvala, M.C. & Benelli, G. (2018). Insecticidal effect and impact of fitness of three diatomaceous earths on different maize hibrids for the eco-friendly control of the invasive stored-product pest *Prostephanus truncatus* (Horn.). *Environmental Science and Pollution Research*. 25(11), 10407-10417. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9565-5>
- Kučerová, Z., & Stejskal, V. (2008). Differences in egg morphology of the stored-grain pests *Rhyzopertha dominica* and *Prostephanus truncatus* (Coleoptera: Bostrichidae). *Journal of Stored Products Research*, 44(1), 103-105. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2007.06.005>

- Kumar, D. & Kalita, P. (2017). Reducing postharvest losses during storage of grain crops to strengthen food security in developing countries. *Foods*, 61(8), 8. <https://doi.org/10.3390/foods6010008>
- Kumar, S., Nehra, M., Dilbaghi, N., Marrazza, G., Hassan, A. A. & Kim, K., H. (2019). Nano-based smart pesticide formulations: Emerging opportunities for agriculture. *Journal of Controlled Release*, 294, 131-153. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2018.12.012>
- Levy-de la Torre, V., A., Gómez-García, L., Borboa-Flores, J., Wong-Corral, F., J., Cinco-Moroyoqui, F., J. & Martínez-Cruz, O. (2018). Actividad citocromo c oxidasa y ATPasa de *Rhyzopertha dominica* bajo el efecto de las atmósferas modificadas. *Biotecnia*, 20(2), 79-84. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v20i2.603>
- López-Ávila, A. (1985). Aspectos biológicos del gorgojo rojo de las harinas *Tribolium castaneum* (Herbst). *Revista Colombiana de Entomología*, 11(1), 28-31. <https://doi.org/10.25100/socolen.v11i1.10253>
- Lorini, I., Krzyzanowski, F.C., França-Neto, J.B., Henning, A.A. & Henning, F.A. (2015). Manejo integrado de plagas de grãos e sementes armazenadas. pp 81-84. Embrapa. Brasília.
- Lunardi, L. & Lorini, I. (2008). Manejo integrado de plagas de grãos armazenados. *Embrapa Trigo-Folder/Folheto/Cartilha (INFOTECA-E)*.
- Maggioni, K., Silva, L.B., Xavier, Z.F., Munhae, C.B. & Dourados, L.R.B. (2016). Performance of populations of *Sitophilus zeamais* Motschulsky (Coleoptera: Curculionidae) on different varieties of maize. *African Journal of Agricultural Research*. 11 (10), 873-881. <https://doi.org/10.5897/AJAR2015.10505>
- Mahroof, R. M., Edde, P. A., Robertson, B., Puckette, J. A. & Phillips, T. W. (2010). Dispersal of *Rhyzopertha dominica* (Coleoptera: Bostrichidae) in different habitats. *Environmental Entomology*, 39(3), 930-938. <https://doi.org/10.1603/EN09243>
- Mahroof, R.M. y Hagstrum, D., W. D.W. Hagstrum, T.W. Phillips y G. Cuperus (ed.) (2012). Biology, behaviour, and ecology of insects in processed commodities. En: *Stored Product Protection*, , pp 33-44. Kansas Research and extension. Kansas.
- Menzel, F., Blaimer, B.B. & Schmitt, T. (2017). How do cuticular hydrocarbons evolve? Physiological constraints and climatic and biotic selection pressures act on a complex functional trait. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 284 (1850), 20161727. <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.1727>
- Neethirajan, S., Karunakaran, C., Jayas, D., S., & White, N., D., G. (2007). Detection techniques for stored-product insects in grain. *Food control*, 18(2), 157-162. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2005.09.008>
- Nwosu, L.C. (2018). Impact of age on the biological activities of *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae) adults on stored maize: implications for Food security

and pest management. *Journal of Economic Entomology*. 111(5), 2454-2460.
<https://doi.org/10.1093/jee/toy187>

- Nwuabani, S.I., Opit, G.P., Otitodun, G.O. & Adesida, M.A. (2014). Efficacy of two Nigeria-derived diatomaceous earths against *Sitophilus oryzae* (Coleoptera: Curculionidae) and *Rhyzopertha dominica* (Coleoptera: Bostrichidae) on wheat. *Journal of Stored Products Research*. 59:9-16,
<https://doi.org/10.1016/j.jspr.2014.04.001>
- Opit, G. P., Thoms, E., Phillips, T., W. & Payton, M., E. (2016). Effectiveness of sulfuryl fluoride fumigation for the control of phosphine-resistant grain insects infesting stored wheat. *Journal of Economic Entomology*, 109(2), 930-941.
<https://doi.org/10.1093/jee/tov395>
- Otitodun, G.O., Opit, G.P., Nwaubani, S.I., Okonkwo, E.U. & Gautam, S.G. (2015). Efficacy of Nigeria-derived diatomaceous earth, botanicals and riverbed sand against *Sitophilus oryzae* and *Rhyzopertha dominica* on wheat. *African Crop Science Journal*. 23(3), 279-293.
- Özkaya, H., Özkaya, B., & Colakoglu, A. S. (2009). Technological properties of a variety of soft and hard bread wheat infested by *Rhyzopertha dominica* (F.) and *Tribolium confusum* du Val. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 7(3/4), 166-172.
- Patiño-bayona, W.R., Nagles Galeano, L.J., Bustos cortes, J.J., Delgado Ávila, W. A., Herrera Daza, E., SUÁREZ, L.E.C., Prieto-Rodríguez, J.A. & Patiño-Ladino, O.J. (2021). Effects of essential oils from 24 plant species on *Sitophilus zeamais* Motsch. (Coleoptera, Curculionidae). *Insects* 12(532),
<https://doi.org/10.3390/insects12060532>
- Pérez, M. J. (1998). Susceptibilidad a insecticidas en poblaciones del picudo del maíz *Sitophilus zeamais* Motschulsky (Coleoptera: Curculionidae) de varias localidades de México (Tesis de Maestría. Chapingo, México. Colegio de Postgraduados).
- Pires, E.M. & Nogueira, R.M. (2018). Damage caused by *Rhyzopertha dominica* (Fabricius,1792) (Coleoptera: Bostrichidae) in stored Brazil nuts. *Scientific Electronic Archives*. 11(1), 57-61.
- Potter, C. (1935). The biology and distribution of *Rhyzopertha dominica* (Fab.). *Transactions of the Royal entomological Society of London*, 83(4).
- Probit Analysis. (1971). 3rd. ed. Cambridge University Press. New York, Ny.
- Quellhorst, H., Athanassiou, C.G., Bruce, A., Scully, E.D. & Morrison III, W.R. (2020). Temperature-mediated competition between the invasive larger grain borer (Coleoptera: Bostrichidae) and the cosmopolitan maize weevil (Coleoptera: Curculionidae). *Environmental Entomology*. 49(1), 255-264.
<https://doi.org/10.1093/ee/nvz151>
- Rahman, I, A., & Padavettan, V. (2012). Synthesis of silica nanoparticles by sol-gel: size-dependent properties, surface modification, and applications in silica-polymer

- nanocomposites: a review. *Journal of Nanomaterials*, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/132424>
- Rai, M., & Ingle, A. (2012). Role of nanotechnology in agriculture with special reference to management of insect pests. *Applied microbiology and biotechnology*, 94(2), 287-293. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-3969-4>
- Rajashekar, Y., Bakthavatsalam, N. & Shivanandappa, T. (2012). Botanicals as grain protectants. *Psyche*. 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/646740>
- Rastogi, A., Tripathi, D.K., Yadav, S., Chauhan, D.K., Živčák, M., Ghorbanpour, M., ... & Brestic, M. (2019). Application of silicon nanoparticles in agricultura. 3 *Biotech*. 9(3), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1626-7>
- Rikta, S., Y., & Rajiv, P. (2021). Applications of silver nanomaterial in agricultural pest control. In *Silver Nanomaterials for Agri-Food Applications* (pp. 453-470). Elsevier.
- Rouhani, M., Samih, M. A., Zarabi, M., Beiki, K., Gorji, M. & Aminizadeh, M. R. (2019). Synthesis and entomotoxicity assay of zinc and silica nanoparticles against *Sitophilus granarius* (Coleoptera: Curculionidae). *Journal of Plant Protection Research*. 26-31.
- Ruiz, J. A., Bravo, E., Ramírez, G., Báez, A. D., Álvarez, M., Ramos, J. L. ... & Byerly, K. (2013). Plagas de importancia económica en México: aspectos de su biología y ecología. *Libro Técnico*, (2), 256.
- Saed, B., Ziaee, M., Kiasat, A., R. & Jafari nasab, M. (2022). Preparation of nanosilica from sugarcane bagasse ash for enhanced insecticidal activity of diatomaceous earth against two stored-products insect pests. *Toxin Reviews*, 41(2), 516-522. <https://doi.org/10.1080/15569543.2021.1903038>
- Said, P., P. & Pashte, V., V. (2015). Botanicals: the protectants of stored Grains pests. *Trends in Biosciences*, 8(15), 3750-3755.
- Salem, A., A. (2020). Comparative insecticidal activity of three forms of silica nanoparticles on some main stored product insects. *Journal of Plant Protection and Pathology*. 11(4), 225-230. <https://doi.org/10.21608/jppp.2020.96009>
- Sami, A., J., Bilal, S., Khalid, M., Nazir, M., T., & Shakoori, A., R. (2018). A Comparative Study of Inhibitory Properties of Saponins (derived from *Azadirachta indica*) for Acetylcholinesterase of *Tribolium castaneum* and *Apis mellifera*. *Pakistan Journal of Zoology*, 50(2), 725-733. <http://dx.doi.org/10.17582/journal.pjz/2018.50.2.725.733>
- SAS Software. SAS System for Windows. 9.0.
- Scheff, D.S., Campbell, J.f. & Arthur, F.H. (2022). Seasonal, landscape and attractant Effects on lesser grain borer, *Rhyzopertha dominica* (F.), captures in Northeast Kansas. *Agronomy*. 12 (99). <https://doi.org/10.3390/agronomy12010099>

- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Maíz, frijol , arroz y trigo, los granos básicos de México. Consultado el 01 de mayo de 2022. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/maiz-frijol-arroz-y-trigo-los-granos-basicos-de-mexico>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2021). *Panorama agroalimentario 2021*. Recuperado el 27 de marzo de 2022. https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2021/Panorama-Agroalimentario-2021
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2022). *Expectativas de producción agropecuaria y pesquera*. Recuperado el 27 de marzo de 2022. <https://www.gob.mx/siap/documentos/expectativas-de-produccion-agropecuaria-pesquera>.
- Shah MR, Imran M, Ullah S., editors. (2017). Chapter 2 – Nanostructured lipid carriers. Lipid-Based Nanocarriers for Drug Delivery and Diagnosis. William Andrew Publishing, Oxford, UK. pp. 37–61.
- Shahzad, K. & Manzoor, F. (2019). Nanoformulations and their mode of action in insects: a review of biological interactions. *Drug and Chemical Toxicology*, 44(1), 1-11. <https://doi.org/10.1080/01480545.2018.1525393>
- Shukla, P., Chaurasia, P., Younis, K., Qadri, O.S., Faridi, S.A. & Srivastava, G. (2019). Nanotechnology in sustainable agricultura: studies from seed priming to post-harvest management. *Nanotechnology for Environmental Engineering*. 4(1), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s41204-019-0058-2>
- Sleem, F.M.A. (2021). Insecticidal effect of *Piper nigrum* L. (Pipeaceae) and *Purnus cersusus* L. (Rosaceae) seeds extract against *Rhyzopertha dominica* F. (Coleoptera: Bostrichidae). *International Journal of Agricultura Innovations and Research*. 9(3), 2319-1473.
- Sparks, T.C., Storer, N., Porter, A., Slater, R., & Nauen, R. (2021). Insecticide resistance management and industry: the origins and evolution of the Insecticide Resistance Action Committee (IRAC) and the mode of action classification scheme. *Pest Management Science*. 77(6), 2609-2619. <https://doi.org/10.1002/ps.6254>
- Sprenger, P.P. & Menzel, F. (2020). Cuticular hydrocarbons in ants (Hymenoptera: Formicidae) and other insects: how and why they differ among individuals, colonies, and species. *Myrmecological news*. 30, 1-26.
- Srivastava, C. & Subramanian, S. (2016). Storage insect pests and their damage symptoms: an overview. *Journal of Grain Storage Research*, 78,53-58. <https://doi.org/10.5958/0974-8172.2016.00025.0>
- Suleiman, R., Rosentrater, K., A. & Bern, C., J. (2015). Evaluation of maize weevils *Sitophilus zeamais* Motschulsky infestation on seven varieties of maize. *Journal of stored products Research*, 64, 97-102. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2015.09.005>

- Trivedi, A., Nayak, N. & Kumar, J. (2018). Recent advances and review on use of botanicals from medicinal and aromatic plants in stored grain pest management. *Journal of Entomology and Zoology Studies*.6(3),295-300.
- Upadhyay, N., Dwivedy, A.K., Kumar, M., Prakash, B. & Dubey, N.K. (2018). Essential oils as eco-friendly alternatives to synthetic pesticides for the control of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae). *Journal of Essential Oil Bearing Plants*. 21(2), 282-297. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2018.1459875>
- Upadhyay, R., K., & Ahmad, S. (2011). Management strategies for control of stored grain insect pests in farmer stores and public ware houses. *World Journal of Agricultural Sciences*, 7(5), 527-549.
- Velasquez, C. A. & Dell'Orto, T. (1983). *Distribución e importancia de los insectos que dañan granos y productos almacenados en Chile*. FAO/INIA-Estacion Experimental La Platina.
- Venugopal, N., V., S. & Sainadh, N., V., S. (2016). Novel polymeric nanoformulation of Mancozeb—An eco-friendly nanomaterial. *International Journal of Nanoscience*, 15(04), 1650016. <https://doi.org/10.1142/S0219581X16500162>
- Villaverde, M. L., Juárez, M. P., & Mijailovsky, S. (2007). Detection of *Tribolium castaneum* (Herbst) volatile defensive secretions by solid phase microextraction-capillary gas chromatography (SPME-CGC). *Journal of Stored Products Research*, 43(4), 540-545. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2007.03.003>
- Wani, T., A., Masoodi, F., A., Baba, W., N., Ahmad, M., Rahmanian, N., & Jafari, S., M. (2019). Nanoencapsulation of agrochemicals, fertilizers, and pesticides for improved plant production. In *Advances in Phytonanotechnology* (pp. 279-298). Academic Press. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815322-2.00012-2>
- Winterbotton, D., C. (1922). Weevil in Wheat and Storage of Grain in Bags: a record of Australian experience during the war period (1915-1919). REE Rogers, government printer.
- Yang, F.L., Li, X.G., Zhu, F. & Li, C.L. (2009). Structural characterization of nanoparticles loaded with garlic essential oil and their insecticidal activity against *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 57(21), 10156-10162. <https://doi.org/10.1021/jf9023118>
- Zahran, N., F., & Sayed, R., M. (2021). Protective effect of nanosilica on irradiated dates against saw toothed grain beetle, *Oryzaephilus surinamensis* (Coleoptera: Silvanidae) adults. *Journal of Stored Products Research*, 92, 101799. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2021.101799>
- Ziaee, M., & Ganji, Z. (2016). Insecticidal efficacy of silica nanoparticles against *Rhyzopertha dominica* F. and *Tribolium confusum* Jacquelin du Val. *Journal of plant protection research*, 56(3), 250-256.